

呼伦贝尔沙质草原风蚀坑地表风沙流结构特征^①张惜伟¹, 汪季², 海春兴¹, 丁延龙², 宝成³

(1. 内蒙古师范大学, 内蒙古 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010019;

3. 陈巴尔虎旗林业局, 内蒙古 巴彦库仁镇 021500)

摘要: 在呼伦贝尔沙质草原北部沙带中段风蚀坑集中分布区内, 选取不同发育阶段的风蚀坑, 通过同步观测风蚀坑地表(0~200 cm)风速及输沙通量, 分析并比较风沙流结构特征, 为呼伦贝尔沙质草原风蚀坑治理提供理论依据。研究表明: 在裸地沙斑、活跃发展、固定阶段及重新活化阶段的风蚀坑, 风速廓线基本遵循对数分布规律; 而在未风蚀草地、消亡阶段的风蚀坑, 气流受下垫面扰动, 呈“S”形分布。风蚀坑各发育阶段输沙量与高度的最优拟合模型为负指数模型, 不同发育阶段风蚀坑内部风沙流输沙量差异较为明显; 超过 95% 的输沙量均在地表 0~30 cm 高度内, 且 63.97%~90.96% 的输沙量集中分布在距地表 10 cm 高度内。风沙流跃移高度与风速正相关, 依次为: 活跃发展>重新活化>裸地沙斑>固定阶段>消亡阶段>未风蚀草地。通过分析风沙流通量系数, 可知在裸地沙斑、活跃发展及重新活化阶段, 输沙量有向高层移动的趋势; 而在其他阶段, 由于植被盖度较高, 使得风沙流多集中在近地层。

关键词: 风沙流结构; 输沙通量; 风蚀坑; 沙质草原; 呼伦贝尔

风沙流结构, 即风沙流沿垂线分布及其变化规律, 是风沙物理学中重要的研究内容之一^[1]。自 Bagnold^[2] 开始对北非沙漠风沙流通量进行观测以来, 国内外学者对地表风沙流进行了大量研究^[3-5], 多数研究集中在正地貌地形(如沙丘、沙山和其他地形)上的输沙量垂线分布及其风沙流运动规律^[6-7], 而关于沙化草原的负地貌地形(如风蚀坑、风蚀洼地)上的风沙流运动规律的研究相对较少^[8-9]。风蚀坑是在地表植被遭受破坏后, 在风力作用下草地下伏沙质沉积物被风力掏蚀, 形成碟形、碗形、槽形等形式的凹地, 沙质沉积物在凹地下风向堆积形成扇形或抛物线形积沙体, 构成风蚀凹槽和沙丘相间分布的特殊地貌景观^[10]。风蚀坑由于其特殊的地貌形态, 坑内气流运动复杂多变, 与常规的沙区风沙活动相比具有一定特殊性。目前, 在风蚀坑形态与气流运动^[11-13]、蚀积速率^[14-15]和演化过程^[16-18]等方面取得了一些成果, 但关于不同演化阶段风蚀坑内风沙活动的研究仍然较少, 通过开展风蚀坑不同发育阶段风沙流结构的研究, 有助于定量描述风蚀坑的发育过程。

呼伦贝尔沙质草原是由沙质草原向沙地演化的典型地区, 已形成大量不同规模、形态和发育阶段的风蚀坑^[19], 是进行野外风蚀坑风蚀活动研究的天然试验场地。针对不同发育阶段的风蚀坑内部地表风速、输沙量进行测定, 分析不同发育阶段风蚀坑内风沙流结构特征及其变化规律, 该研究对补充完善风蚀坑发育理论及针对风蚀坑的发育阶段采取有效的防治措施提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 试验样地与风蚀坑发育阶段确定

试验基地设在陈巴尔虎旗完工镇东南方向 15 km 处(118°57'E, 49°11'N), 为风蚀坑集中分布区, 根据张德平等^[20]对呼伦贝尔沙质草原风蚀坑的形态、分类的研究成果, 结合 RTK(real-time kinematic)载波相位差分技术实地测量结果, 将风蚀坑划分为裸地沙斑、活跃发展、固定阶段、消亡阶段、重新活化等 5 个发育阶段。对选定的各发育阶段风蚀坑测定其坑长、坑宽等形态参数(表 1)。

① 收稿日期: 2018-01-24; 修订日期: 2018-06-20

基金项目: 国家重点研发计划课题: 绿洲、盐碱湖区沙害防治关键技术与示范(2016YFC0501003)

作者简介: 张惜伟(1980-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: zwx1228@126.com

通讯作者: 汪季。E-mail: wangji1957@163.com

表 1 不同发育阶段风蚀坑形态参数

Tab.1 Morphologic parameters of blowouts at their different development stages

发育阶段	样本数/个	坑长/m	坑宽/m	坑深/m	植被覆盖度/%
裸地沙斑	3	23.56 ± 4.12	15.30 ± 3.64	0.85 ± 0.18	18.2 ± 0.23
活跃发展	3	68.87 ± 13.69	33.77 ± 6.75	5.06 ± 1.37	4.1 ± 0.68
固定阶段	3	48.66 ± 11.88	26.45 ± 5.02	2.71 ± 0.62	24.8 ± 3.51
消亡阶段	3	121.08 ± 26.97	83.12 ± 13.68	4.93 ± 1.04	45.9 ± 5.11
活化阶段	3	45.23 ± 8.86	28.44 ± 6.50	2.42 ± 0.67	29.6 ± 3.88

1.2 风蚀坑地表风沙流测试

试验开设于 2016 年 5 月 15—25 日,在不同发育阶段风蚀坑出风口的坑口位置,架设 HOBO 小型移动气象站进行风速、风向同步观测,同时以未风蚀草地作为对照。风杯设置 5 个高度,分别为距地表 10 cm、20 cm、50 cm、100 cm 和 200 cm(图 1)。每个样地测定时间为 20 min,每 2 s 记录 1 次数据。

该试验依靠 2 台 HOBO 小型移动气象站完成,一台固定于未风蚀草地,提供对照风速;一台作为活

动站,实测各个风蚀坑样坑的出风口坑口位置处的风速。考虑单台设备无法保证各样坑同时测量,采用标准化风速(v_i/v_{200})来衡量各样本间风速的大小(表 2),其中 v_i 代表活动站实测风速, v_{200} 代表固定站近地表 200 cm 处风速。

1.3 输沙通量观测试验

选定测量时段,对应实时旷野风速、风向,同时在 5 个发育阶段风蚀坑出风口处,以及未风蚀草地上,各架设阶梯式集沙仪进行风沙通量观测,集沙仪



图 1 风蚀坑气流观测实验装置

Fig.1 Experimental device for observing blowout airflow

表 2 风蚀坑各发育阶段不同高度处标准化风速

Tab.2 Standardized wind speed at different heights and different development stages of blowout

风杯高度	未风蚀草地	裸地沙斑	活跃发展	固定阶段	消亡阶段	重新活化
$H_{10\text{ cm}}$	0.46 ± 0.01b	0.66 ± 0.02a	0.72 ± 0.06a	0.52 ± 0.01b	0.51 ± 0.01b	0.71 ± 0.02a
$H_{20\text{ cm}}$	0.63 ± 0.01a	0.71 ± 0.03a	0.78 ± 0.02a	0.61 ± 0.02a	0.64 ± 0.01a	0.77 ± 0.01a
$H_{50\text{ cm}}$	0.57 ± 0.01b	0.78 ± 0.05a	0.86 ± 0.05a	0.71 ± 0.04a	0.59 ± 0.02b	0.79 ± 0.01a
$H_{100\text{ cm}}$	0.78 ± 0.01b	0.84 ± 0.05ab	0.94 ± 0.02a	0.82 ± 0.07ab	0.80 ± 0.02ab	0.90 ± 0.01a
$H_{200\text{ cm}}$	0.86 ± 0.02a	0.90 ± 0.04a	0.99 ± 0.01a	0.91 ± 0.03a	0.89 ± 0.01a	0.95 ± 0.01a

注:标准化风速值为平均值 ± 标准差,字母不同表示不同阶段的标准化风速值差异显著($P < 0.05$)。

高度为 50 cm,均分为 16 层,即按 3.125 cm 间距分层收集风蚀物,集沙仪上方带有风叶,可根据风向自动转向以保证集沙口始终对准来沙方向。试验期间进行了 6 次输沙量测定,测定期间分别在各样坑集沙仪旁采用硬质 PVC 管架设风杯,同步观测地表 200 cm 高度处风速;每次观测期结束后,将集沙盒内的风蚀物分层装入塑封袋内,带回实验室用天平称重(精确度 0.001 g),得出每层输沙量($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)。对风蚀坑各发育阶段输沙量与高度进行拟合分析,拟合模型采用负指数模型,其公式为:

$$Q = a \exp^{-bh} \quad (1)$$

式中: Q 为输沙量($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$); a 、 b 为风沙流量系数; h 为高度(cm)。

2 结果与分析

2.1 风蚀坑地表气流变化特征

输沙量测定期间对应旷野风速、风向测定(图 2)可知,旷野风向主要为正西风、西北西风,风速集中在 $6.5 \sim 9.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,地表起沙较为频繁。

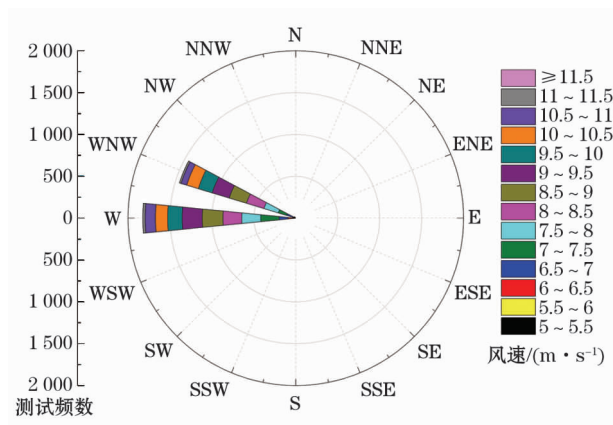


图 2 集沙对应旷野风速风向玫瑰图

Fig. 2 Rose chart of wind speed and wind direction around the sand collector and in the open field

作为反映近地表气流活动特征的重要指标之一,由风速廓线可知近地表风速沿高度在垂直方向上的分布状况。一般而言,风速廓线随高度增加遵循对数分布,但当地表平面由于地形、植被、障碍物等有所起伏时,下垫面对气流的扰动使得气流发生变化,能量受到一定损失,其分布规律则不再严格遵守对数规律^[5,7]。由风蚀坑各发育阶段地表风速廓线分布情况可知(图 3),对于有植被覆盖的未风蚀

草地地表,在 200 cm 高度内,风速廓线基本呈“S”形分布,且风速整体较低。当植被遭受破坏,地表有沙斑出现时,风速迅速加大,无植被覆盖时,气流受到的约束大大减小,在垂向上基本呈现对数分布规律,随着风蚀坑继续发育,在其发展最为活跃阶段,风速最大,地表风速可达 $6.99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风沙活动剧烈。在风蚀坑固定阶段,风蚀活动减弱,风速降低,此时地表基本已无植被,风速廓线仍基本遵循对数分布。风蚀坑在消亡阶段随着植被逐渐恢复,气流活动受地表植被扰动,又呈“S”形分布。在植被再次退化时,即风蚀坑再次活化阶段,风速廓线又符合对数分布规律。

2.2 风蚀坑内部风沙流沿高度分布

由各发育阶段风蚀坑平均输沙量随高度分布状况(图 4),不同发育阶段风蚀坑内部风沙流输沙量

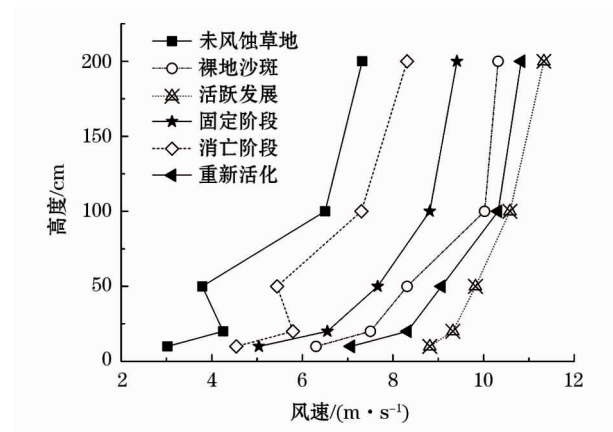


图 3 不同发育阶段风蚀坑风速廓线

Fig. 3 Wind velocity profiles over blowouts at their different development stages

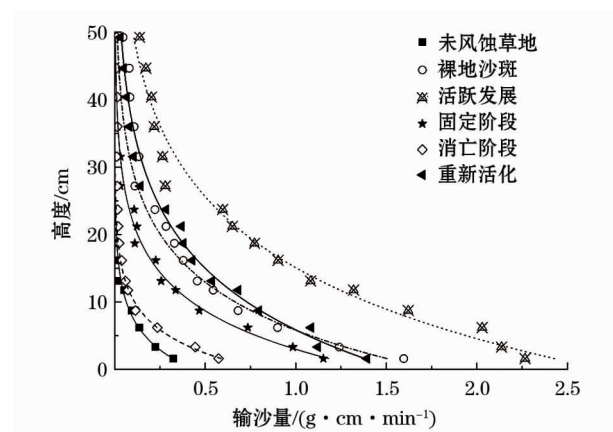


图 4 不同发育阶段风蚀坑输沙量沿高度的分布

Fig. 4 Distribution of sediment transport along the height of blowouts at their different development stages

差异较为明显,裸地沙斑、活跃发展阶段输沙量分别为未风蚀草地的 7.87 倍和 16.03 倍,固定阶段和消亡阶段输沙量有所降低,但仍达到未风蚀草地的 5.06 倍和 1.72 倍。在消亡风蚀坑再次活化时,其内部风蚀活动加剧,输沙量再次增大到未风蚀草地的 7.54 倍。

由风蚀坑各发育阶段风沙流模型拟合函数得出(表 3),各阶段平均输沙量均随高度增加而呈指数递减规律。风沙流量系数常用作反映不同地貌条件下风沙流输送特点,其中,系数 a 可用来指征不同地貌状况近地表输沙量的差异,反映近地表蠕移输沙量或风沙流中沙粒浓度最大值^[12],系数 b 反映了沙粒浓度随高度变化的衰减速率^[21]。由表 2 的拟合函数可知,系数 a 依次为:活跃发展 > 重新活化 > 裸地沙斑 > 固定阶段 > 消亡阶段 > 未风蚀草地,在风蚀活动较强烈的发育阶段,如活跃发展阶段及重新活化阶段,近地表风沙流中尘粒蠕移量较大,而在植被条件稍好、风蚀活动较弱的阶段,如未风蚀草地阶段,该值相应较小。系数 b 依次为:固定阶段 > 未风蚀草地 > 重新活化 > 消亡阶段 > 裸地沙斑 > 活跃发展,表明随距离地表高度增大,风沙流沙粒浓度的递减速率逐渐减慢,风沙流下层相对输沙量逐渐降低,而上层相对输沙量相应升高。

表 3 不同发育阶段风蚀坑输沙量沿高度的拟合函数
Tab.3 Fitting functions of sediment transport along the height of blowouts at their different development stages

阶段	拟合函数	R^2
未风蚀草地	$Q = 0.15 \exp^{-0.098h}$	0.84
裸地沙斑	$Q = 1.29 \exp^{-0.07h}$	0.96
活跃发展	$Q = 2.57 \exp^{-0.065h}$	0.97
固定阶段	$Q = 1.16 \exp^{-0.107h}$	0.97
消亡阶段	$Q = 0.23 \exp^{-0.08h}$	0.77
重新活化	$Q = 1.63 \exp^{-0.081h}$	0.99

跃移高度指风沙流累积输沙量达到总输沙量 50% 所对应的高度,反映了地表沙粒受气流剪切力的影响,以此为界限,其上下两部分空间内气流输送的沙量相同^[22-23]。对累积输沙含量百分比和高度进行拟合(图 5),并可据此求出平均跃移高度,风蚀坑各发育阶段风沙跃移高度依次为:活跃发展 > 重新活化 > 裸地沙斑 > 固定阶段 > 消亡阶段 > 未风蚀草地。

将风蚀坑不同发育阶段的风沙流跃移高度与

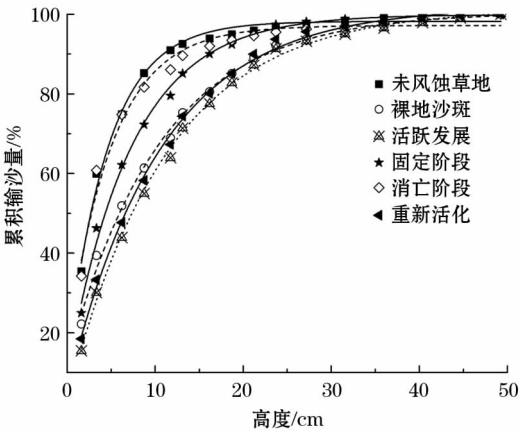


图 5 累积输沙量百分比随高度的变化

Fig.5 Percentage of accumulated sediment transport along the height of blowouts

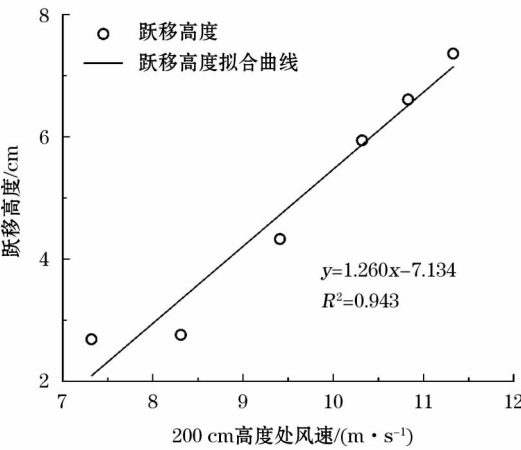


图 6 沙粒平均跃移高度与风速的关系

Fig.6 Relationship between average saltation height of sand particles and wind speed

200 cm 高处风速进行线性拟合(图 6),可知二者具有拟合度较好的正相关关系,平均跃移高度随风速增大而增大。这表明,弱风条件下,气流搬运能力较弱,沙粒只能在较低的高度输送,下层搬运沙粒比重较大。当风速加大时,气流携沙能力相应增强,更多的沙粒被裹挟到较高的空间,上层输沙量增加,使得平均跃移高度增大。

2.3 风蚀坑风沙流结构特征

根据前人的研究结果,风沙流一般在一定高度内输送,吴正^[1]认为超过 90% 的沙量在 0 ~ 30 cm 高度内输送,而其中又有 80% 集中在地表 10 cm 高度内。刘芳等^[24]得出乌兰布和沙漠风沙流有 42.8% ~ 70.7% 集中在 0 ~ 10 cm 高度内,且不随下垫面变化而变化。而韩致文等^[7]通过对塔克拉玛

表 4 不同发育阶段风蚀坑各高度的输沙量

Tab.4 Sediment transport at different heights of blowouts at their different development stages

各高度输沙量	$Q_{0-50\text{ cm}}$	$Q_{0-30\text{ cm}}$		$Q_{0-10\text{ cm}}$	
	总输沙量	输沙量	占总输沙量	输沙量	占总输沙量
	$\text{/(g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$	$\text{/(g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$	比例/%	$\text{/(g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$	比例/%
未风蚀草地	0.91 ± 0.16e	0.90 ± 0.21e	98.39	0.83 ± 0.20d	90.96
裸地沙斑	7.20 ± 1.64b	6.88 ± 1.62b	95.56	4.96 ± 1.33b	68.94
活跃发展	14.65 ± 3.28a	13.92 ± 2.72a	95.01	9.37 ± 1.98a	63.97
固定阶段	4.62 ± 0.88c	4.56 ± 0.94c	98.75	3.68 ± 0.96b	79.54
消亡阶段	1.68 ± 0.37d	1.62 ± 0.31d	96.94	1.44 ± 0.41c	86.06
重新活化	7.54 ± 1.89b	7.32 ± 1.03b	96.98	5.08 ± 1.23b	67.28

注: Q_{0-50} 为近地表 0 ~ 50 cm 高度内输沙量, Q_{0-30} 为近地表 0 ~ 30 cm 高度内输沙量, Q_{0-10} 为近地表 0 ~ 10 cm 高度内输沙量。输沙量数据为平均值 ± 标准差, 字母不同表示不同阶段输沙量差异显著 ($P < 0.05$)。

干沙漠风沙活动的观测, 得出 80% ~ 95% 的输沙量集中在近地表 10 cm 高度内。通过对研究区风蚀坑风沙流的测定 (表 4), 得出在各发育阶段, 超过 95% 的输沙量均在 0 ~ 30 cm, 而在 0 ~ 10 cm 高度内, 集中了 63.97% ~ 90.96% 的输沙量, 风蚀活动越剧烈。如裸地沙斑、活跃发展及重新活化阶段, 其输沙量有向高层移动的趋势, 而在植被条件稍好的阶段, 植被的固沙阻沙作用使得风沙流多集中在近地层。

3 讨论

自 20 世纪 30 年代 Bagnold^[2] 率先提出风速廓线并开始应用于风沙流结构研究以来, 随着野外观测手段、室内风洞试验平台、计算机数值模拟技术的不断发展, Owen^[25] 对风速廓线的 VonKarman 常数进行了修订, 并研究了风速廓线在起沙条件下的分布, 总体上仍认为风速廓线呈对数分布。理想的风速廓线是在稳定床面上获取的, 而野外下垫面条件非常复杂, 植被、地形起伏、沙物质粒径、气流中沙物质的浓度等均对风速廓线的分布产生干扰, 使其不再严格遵守对数分布^[1]。以植被为例, 气流在植株的影响下, 风速廓线会发生相对位移, 位移高度与植被高度存在对数关系^[26]。呼伦贝尔草原为沙质基质, 在草地表面受外界干扰下产生破口后, 大量沙物质被掏蚀散播在植物上方, 引起草本死亡, 地表出现裸露^[27], 草原地区较为平坦的地表在覆沙后类似于理想的光滑床面, 此时气流缺乏约束, 其沿高程的分布基本遵循对数分布规律。随着风蚀坑迅速发展, 坑内外形成正地貌地形 (沙丘、风蚀雅丹) 和负地貌地形 (风蚀坑、风蚀洼地) 相间分布的景观, 地表起

伏状况非常复杂, 风蚀坑内部气流方向多变, 气流方向与风蚀坑轴线的夹角, 风蚀坑内各方位坑壁相对与入射风向的位置和坡度等决定了风速廓线的形式, 使其与常见的对数分布存在偏差^[13]。

对于风沙流结构呈现的何种函数分布, 目前存在多种观点。哈斯^[6] 认为流沙床面上的输沙量随垂直高度的分布基本满足指数函数分布, 冯大军等^[28] 对非均匀沙床面输沙量的垂向分布进行了分段拟合, 认为在远离床面区符合指数递减规律, 近床面区实测的输沙量偏离指数规律, 实测值一般较拟合值偏大。本研究通过对不同发育阶段风蚀坑地表风沙流沿高度的拟合, 发现在风蚀坑各发育阶段, 其风沙流分布均遵循负指数分布, 这与前人研究结果一致。根据表 3 风沙流通量系数 a 的拟合结果可知, 在风蚀活动较强烈的发育阶段, 近地表风沙流中尘粒蠕移量较大, 而在植被条件稍好、风蚀活动较弱的阶段, 该值相应变小。与此同时, 系数 b 变化规律与系数 a 大致相反, 风沙流沙粒浓度沿高度增加的递减率随着风沙活动强度增大而减小。结合风沙跃移高度和风沙流结构在不同发育阶段的变化规律, 可认为在地表风沙活动强烈的阶段, 如活跃发展、重新活化及裸地沙斑阶段, 风沙流有向上层移动的趋势, 而在风沙活动稍弱的阶段, 如固定阶段、消亡阶段及未风蚀草地阶段, 风沙流则有向地表贴近的趋势。

4 结论

(1) 在风蚀坑发展过程中的裸地沙斑、活跃、固定及其重新活化阶段, 风速廓线基本遵循对数分布规律; 而在未风蚀草地、风蚀坑的消亡阶段, 由于地

chinaXiv:201811.00013v1

形、植被、障碍物等有所起伏,下垫面对气流的扰动使得气流发生变化,能量受到一定损失,其风速廓线分布规律偏离对数规律,呈“S”形分布。

(2) 风蚀坑各发育阶段输沙量与高度的最优拟合模型为负指数模型和对数模型,不同发育阶段风蚀坑内部风沙流输沙量差异较为明显。活跃发展阶段输沙量为未风蚀草地输沙量的 16.03 倍;其次裸地沙斑、风蚀坑再次活化阶段的输沙量分别为 7.87 倍、7.54 倍;固定阶段和消亡阶段输沙量有所降低,但仍达到未风蚀草地的 5.06 倍和 1.72 倍。活跃发展阶段的 a 值最大,说明在风蚀活动较强烈的发展阶段,近地表风沙流中尘粒蠕移量相对较大;活跃发展阶段的系数 b 值最小,表明此阶段的沙粒浓度随高度增加的衰减速率最快。

(3) 在风蚀坑的发育发展阶段,如活跃发展、裸地沙斑及重新活化阶段,其输沙量有向高层移动的趋势,而在稳定阶段,植被盖度较高,使得风沙流多集中在近地层。在风蚀坑发育较为迅速,并且风蚀活动较剧烈的阶段,风沙流特征值均大于 1,此时强风将沙粒搬运到较高的上层,风沙流处于不饱和状态,具有很强的输沙能力。

参考文献 (References):

- [1] 吴正. 风沙地貌及治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 61 - 69. [Wu Zheng. Aeolian Geomorphology and Sand Control Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003: 61 - 69.]
- [2] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen, 1941: 265.
- [3] 董玉祥, Hesp P A, Namikas S L, et al. 海岸横风向沙脊表面风沙流结构的野外观测研究[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 507 - 512. [Dong Yuxiang, Hesp P A, Namikas S L, et al. Field measurements of structure of wind sand flow on coastal transverse ridge in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(4): 507 - 512.]
- [4] Wang X, Dong Z, Qu J, et al. Dynamic processes of a simple linear dune: A study in the Taklimakan Sand Sea, China [J]. Geomorphology, 2003, 52(3 - 4): 233 - 241.
- [5] 张正德, 董治宝. 腾格里沙漠东南部野外风沙流观测[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 973 - 980. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. Field observation of aeolian sediment flux in the southeast Tengger Desert [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 973 - 980.]
- [6] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J]. 科学通报, 2004, 49(11): 1 099 - 1 104. [Hasi Eerdun. The preliminary study on sand dunes flow structure variation in the southeast Tengger Desert [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(11): 1 099 - 1 104.]
- [7] 韩致文, 缙倩倩, 杜鹤强, 等. 新月形沙丘表面 100 cm 高度内风沙流输沙量垂直分布函数分段拟合[J]. 地理科学, 2012, 32(7): 892 - 897. [Han Zhiwen, Gou Qianqian, Du Heqiang, et al. The piecewise fitting of sand flux vertical distribution of wind-sand flow within 100 cm height above the barchan dune surface [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(7): 892 - 897.]
- [8] Hesp P A. Flow dynamics in a trough blowout [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1996, 77(3 - 4): 305 - 330.
- [9] 李双权, 哈斯, 杜会石, 等. 沙质草地碟形风蚀坑形态 - 气流相互作用[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1 201 - 1 209. [Li Shuangquan, Hasi Eerdun, Du Huishi, et al. Interaction between airflow and shape of saucer blowout in sandy grassland [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1 201 - 1 209.]
- [10] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [Wu Zheng. Aeolian Geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987.]
- [11] 庄燕美, 哈斯. 沙丘风蚀坑的形态及动力过程的研究进展[J]. 干旱区地理, 2005, 28(5): 632 - 637. [Zhuang Yanmei, Hasi Eerdun. Progress of the study on shapes and dynamical process of blowouts on dunes [J]. Arid Land Geography, 2005, 28(5): 632 - 637.]
- [12] Dong Z B, Liu X P, Wang H T, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: A wind tunnel investigation [J]. Geomorphology, 2003, 49(3): 219 - 230.
- [13] 孙禹, 杜会石, 刘美萍, 等. 风蚀坑形态 - 动力学研究进展[J]. 地理科学, 2015, 35(7): 122 - 125. [Sun Yu, Du Huishi, Liu Meiping, et al. A review on morphodynamic processes of blowouts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(7): 122 - 125.]
- [14] 石占飞, 王力, 王建国. 陕北神木矿区土壤颗粒体积分形特征及意义[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 394 - 400. [Shi Zhanfei, Wang Li, Wang Jianguo. Volume fractal characteristics and significance of soil particles in the Shenmu colliery in north Shaanxi Province [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 394 - 400.]
- [15] 樊立娟, 胡广录, 廖亚鑫, 等. 河西走廊斑状植被区表层土壤粒径及其分形维数的空间变异特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1 068 - 1 075. [Fan Lijuan, Hu Guanglu, Liao Yaxin, et al. Spatial variability of soil particle size and its fractal dimension of patchy vegetation in Hexi Corridor [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1 068 - 1 075.]
- [16] Stout J E, Zobeck T M. The wolfforth field experiment: A wind erosion study [J]. Soil Science, 1996, 161(9): 616 - 632.
- [17] Gao Y, Dang X H, Yu Y, et al. Effects of tillage methods on soil carbon and wind erosion [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27(3): 583 - 591.
- [18] 李双权, 哈斯, 马玉凤, 等. 沙质草地风蚀坑动态演变特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 955 - 960. [Li Shuangquan, Hasi Eerdun, Ma Yufeng, et al. Dynamic evolution of blowouts in sandy grassland [J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 955 - 960.]
- [19] 张德平, 冯宗炜. 呼伦贝尔草原沙漠化现状、潜在危险及对策[J]. 北方经济, 2006(8): 23 - 24. [Zhang Deping, Feng Zongwei. Desertification status, potential hazards and countermeasures in Hulun Buir Grassland [J]. Northern Economy, 2006(8): 23 - 24.]
- [20] 张德平, 王效科, 哈斯, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(1)——形态、分类、研究意义[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 894 - 902. [Zhang Deping, Wang Xiaoke, Hasi Eerdun, et al. Study on blowouts(1): Morphology, classification and research sig-

- nificance in Hulun Buir Sandy Grassland[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(6): 894 – 902.]
- [21] 康永德, 何清, 杨兴华, 等. 基于野外观测的风沙流跃移和蠕移运动规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 119 – 125. [Kang Yongde, He Qing, Yang Xinghua, et al. Research on saltation and creeping laws of wind-blown currents based on field observations[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5): 119 – 125.]
- [22] 周颖, 曹月娥, 杨建军, 等. 古尔班通古特沙漠东缘风沙流结构特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 78 – 83. [Zhou Ying, Cao Yue'e, Yang Jianjun, et al. Sand flow structure characteristics in east of Gurbantunggüt Desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 78 – 83.]
- [23] 熊敏, 何清, 杨兴华, 等. 塔克拉玛干沙漠平坦沙地风沙流结构的时空差异性研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(3): 412 – 416. [Xiong Min, He Qing, Yang Xinghua, et al. The spatial difference of wind sand flow structure over a flat sandy surface of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition), 2017, 30(3): 412 – 416.]
- [24] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1 200 – 1 207. [Liu Fang, Hao Yuguang, Xin Zhiming, et al. The surface aeolian-sand flow structure in the northeastern margin of the Ulanbuh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(5): 1 200 – 1 207.]
- [25] Owen P R. Saltation of uniform grains in air[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 20(2): 225 – 242.
- [26] 赵彩霞, 郑大玮, 何文清. 植被盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 68 – 73. [Zhao Caixia, Zheng Dawei, He Wenqing. Vegetation cover changes over time and its effects on resistance to wind erosion[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(1): 68 – 73.]
- [27] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 293 – 299. [Zhang Xiwei, Wang Ji, Gao Yong, et al. Soil grain size characteristics in blowouts in the Hulun Buir Sandy Grassland[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 293 – 299.]
- [28] 冯大军, 倪晋仁, 李振山. 风沙流中沙粒粒度的垂直和水平分布特征[J]. 泥沙研究, 2008, 53(5): 22 – 30. [Feng Dajun, Ni Jinren, Li Zhenshan. Vertical and horizontal profiles of grain size in aeolian sand transport[J]. Journal of Sediment Research, 2008, 53(5): 22 – 30.]

Structure of Drifting Sand Flow over the Surface of Blowouts in the Hulun Buir Sandy Grasslands

ZHANG Xi-wei¹, WANG Ji², HAI Chun-xing¹, DING Yan-long², BAO Cheng³

(1. Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China;

2. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China;

3. Forestry Bureau of Old Barag Banner, Bayan Kuku 021500, Inner Mongolia, China)

Abstract: The blowouts at different development stages in the northern sandy zone of the Hulunbuir sandy grasslands were selected to analyze and compare the structure of drifting sand flow based on the simultaneous observation of wind-sand flux over blowout surface (0 – 200 cm). The purpose of the study was to provide a theoretical basis for wind erosion control in sandy grasslands. The results showed that the wind profiles were in a logarithmic distribution in the sand patches at their different development stages, while the un-eroded grasslands and the blowouts at their extinction stage were in an “S-shaped” distribution because the air flow was disturbed by the underlying surface. The optimal fitting model for sand flux and height over blowout at each development stage was a negative exponential model, and the difference of sand flux in blowout at different development stages was obvious. More than 95% sand flux was distributed within a height of 0 – 30 cm from the land surface, and 63.97% – 90.96% sand flux was distributed in 10 cm height. The sand saltation height was positively correlated with wind speed and in an order of active development > reactivation stage > sand patch > fixed stage > extinction stage > un-eroded grassland. The analyzed results of sand flux coefficient revealed that the high value of sand flux moved upwards over sand patch at the active development and reactivation stages, and the wind-blown sand flux concentrated near ground because of the high vegetation coverage.

Key words: structure of drifting sand flow; sand flux; blowout; sandy grassland; Hulun Buir